

触覚提示・画像誘導機能を持つ内視鏡型手術ロボットの開発

Development of a New Endoscopic Surgical Robot System with Haptic Sensations and Navigational Function

鈴木 直樹 (SUZUKI NAOKI)
東京慈恵会医科大学・医学部・教授



研究の概要

内視鏡を用いた消化管内の外科的処置法の開発は近年格段に多様化し、かなりの外科的処置での臨床応用例が報告されるようになってきた。しかしながら処置内容には限界が見られ、さらにまた適用可能な処置を完了するにも多大な時間を必要とし、かつ術者にとっても多大な労力を必要とし、かつ個人的な技量の習熟も必要とするのが事実である。本研究課題では、内視鏡先端部が首を振ることのできる眼（レンズ）の付いた頭部とし、この頭部の左右から対象物を力強くつかみ、持ち上げ、おさえる腕に相当するアーム型鉗子を装備し、マンマシンのにも **Open Surgery** と変わらない自由度の外科的作業を行える装置の開発を目的として研究開発を実施した。

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・消化器外科学

キーワード：手術ロボット・内視鏡・Data fusion・触覚提示・NOTES・遠隔手術

1. 研究開始当初の背景

内視鏡を用いた消化管内の外科的処置法の開発は近年格段に多様化し、かなりの外科的処置での臨床応用例が報告されるようになってきた。しかしながら処置内容には限界が見られ、さらにまた適用可能な処置を完了するにも多大な時間を必要とし、かつ術者にとっても多大な労力を必要とし、かつ個人的な技量の習熟も必要とするのが事実である。このような現状の大きな原因の一つはこれらの処置を内視鏡技術を基本形としているため、かなり無理がある外科的処置となってしまっている点であると考えられる。つまり、内視鏡に装備されている鉗子孔を通る道具だけでは、多様で自由な手術手技は望めない。また通常の手術用ロボットでは、ロボットの視野が消化管内のどの位置でどの方向を向いているのかを把握するには難しく、ナビゲーション機能を有するロボットの開発が望まれる。

2. 研究の目的

われわれが計画しているのは、内視鏡先端部が首を振ることのできる眼（レンズ）の付いた頭部とし、この頭部の左右から対象物を力強くつかみ、持ち上げ、おさえる腕に相当するアーム型鉗子を装備し、マンマシンのにも **Open Surgery** と変わらない自由度の外科的作業を行える装置の開発を目的としている。このような手術用ロボットにより、体表面を貫通することなく消化

管を進入路とし、からだの中でありながら開腹手術と同じ自由度をもって手術作業のできる手術用ロボット、言うなれば内視鏡ロボットの開発ならびにこのロボット手術をより正確、高速にするための専用画像誘導システムの開発を目的としている。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトの研究方法は大きく5つに分類される。本開発システムの根幹となるシステムの機能である、ロボットの手術操作機能、画像誘導機能、ロボットアームの触覚提示機能の開発を行った。開始当初より、開発成果を正確に評価、把握するためにブタを用いた動物実験により、臨床に近い環境下での検証を心がけた。4つ目はヒトの体内での開発システムの検証と改良である。これについてはヒト遺体（Soft Cadaver）を用いることにより、できるだけ臨床に近い環境下での検証実施を試みた。5つ目は本開発システムを活用した **Tele-NOTES** 機能の開発と内視鏡ロボットの遠距離からの **Tele-control** 実験であった。これは臨床試験に向かえない代わりに本開発システムの将来性をにらんだ新たな挑戦として選んだ選択肢であった。

4. 研究の主な成果

本プロジェクトに適した各 부품の構造、サイズ、アームの取り付け位置・方向、強度などを考慮して **CAD** システムにより設計し、ロボットアームを製作した。これを利用し、ア

ーム稼働範囲、内視鏡自体の動作を検証し、作業内容を拘束することのないようなアーム取り付け位置を決定してからロボット本体部分の製作を行った。

内視鏡ロボット用の Data Fusion システムの機能としては、特に体内でロボット先端部の位置、方向に関する情報を得やすいシステムとすることを心掛けた。ファントム実験、摘出臓器を用いた実験により、内視鏡

画像上で、肉眼では見ることのできない内部構造の情報を重畳表示する Data Fusion 画像誘導機能を決定した。

内視鏡ロボット手術において、より安全な手術手技を実施するための機能として、マニピュレータ先端部に圧センサを配置することなく先端部が軟組織に接触した際の反力をマスタ側で提示するための機能を開発した。ロボットアーム先端部は術者コントローラの指示に追従するように制御されるが、物体に接触して動作が阻害されるとスレーブとマスタの位置追従後差分だけ駆動しているワイヤの張力が増えることを利用し、反力を推定した。

内視鏡ロボット本体の開発と同時に開発を進めてきた Data Fusion 画像誘導システムと haptic feedback システムをロボットアームを装備した内視鏡本体に融合し、相互的な動作の干渉、各機能のテストをファントム実験、摘出臓器実験によって行い、Data Fusion 機能を持つ haptic feedback 付のロボットシステムとした。

本システムを臨床に用いるために人体の形態学的特徴に由来する体内作業が可能であることを確認するため、ヒトの遺体を用いた動作機能検証の可否の検討を行った。しかしながら生体の臓器と同じ柔らかさと柔軟性を持つ Soft cadaver を利用することは日本国内では困難であるため、タイ国内に内視鏡ロボットシステムを輸送しチュラロンコン大学医学部の協力を得てヒト体内での機能評価試験を実施した。

本システムを遠隔からでも操作可能な遠隔手術ロボットシステムを構築し、日本・タイ間において上記性能評価と同様にヒトの遺体 (Soft Cadaver) を用いて遠隔手術

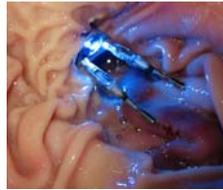


図1 摘出臓器を用いた食道から胃に到達したロボット先端部の様子

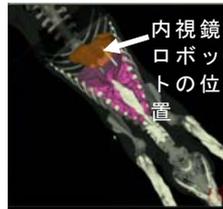


図2 動物実験における画像誘導システム表示例

(Tele-NOTES) の実験を行なうことを橋爪誠教授をはじめとする九州大学外科チームの応援を得て行なった。このためのシステムは、内視鏡型手術ロボットとこれをコントロール

するためにネットワークによって接続された術者用のコントローラに大きく分類される。

実験ではマニピュレータを操作する日本側の術者と内視鏡スコープ自体を操作するタイ側の術者が、共同で手技を行ない、上記のネットワーク環境下で腹腔内に挿入したロボットを日本側からコントロールして消化管癌を想定したリンパ節切除を行なうことができた。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

研究代表者鈴木は、本研究開発も含めた受賞理由により、Medicine Meets Virtual Reality (MMVR) からの年次賞である The Satava Award (サタバ賞) を同賞としては日本人で初めて授与された。また、本開発内容が「初めての NOTES 型の手術ロボット」として国外の研究者から紹介されている。国内外でのマスコミによる成果発表もあり、共同開発について手術ロボット開発企業を含む医学系企業からの申込があった。

6. 主な発表論文

Suzuki N, Hattori A, Ieiri S, Konishi K, Maeda T, Fujino Y, Ueda Y, Navicharen P, Tanoue K, Hashizume M, Tele-control of an endoscopic surgical robot system between Japan and Thailand for Tele-NOTES, Medicine Meets Virtual Reality 17, 2009, 374-9

Hattori A, Suzuki N, Suzuki S, Hayashibe M, Otake Y, Kobayashi S, General development plan of surgical robotic systems, Computer Assisted Radiology and Surgery 2006, International Congress Series

Hattori A., Suzuki N, Hayashibe M, Suzuki S, Otake Y, Tajiri H, Kobayashi S, Development of a navigation function for an endoscopic robot surgery system, Stud. Health Technol. Inform., 111, 2005, 167-71



図3 日本・タイ間遠隔手術実験におけるタイ側の実験の様子



図4 内視鏡ロボット術野画像